基于熵权的黄河流域生态环境演变特征研究

张金良，陈凯*，张超，郭鹏程

（黄河勘测规划设计研究院有限公司，河南 郑州 45003）

摘要：黄河流域生态环境系统十分复杂，开展黄河流域生态环境质量综合评估和演变研究，为流域系统治理提供科学依据，是当前普遍关切和急需解决的问题之一。本研究基于系统论和信息熵理论，对黄河流域 1980 年～2019 年重要生态环境指标数据进行熵权分析，发现各项指标的熵权存在随时间序列的动态变化，单一年度的指标权重结构随时间变化不断调整，各项指标在系统中的重要性非恒定。在此基础上，计算得到近 40 年黄河流域的环境发展指数（Environment Development Index，EDI），EDI 范围为 56.64～76.60。1980 年～2019 年黄河流域 EDI 总体呈现“稳定-增长”的变化趋势，2003 年显著增长，之后 EDI 持续上升。说明经过多年的保护与治理，黄河流域生态环境负反馈效应正在显现，系统逐步由混乱无序向稳定有序发展，黄河流域生态环境整体向好。

关键词：生态环境，演变特征，植被覆盖度，生境质量，黄河流域

中图分类号： **文献标识码：**A

1 研究背景

生态环境是由生物群落及非生物自然因素组成的各种生态系统所构成的整体。长期以来，在自然因素和人为因素的共同作用下，生态环境以不同的时空尺度在发展演变。随着社会发展和科学进步，人与自然和谐共生的意识理念逐渐取代了传统的“掠夺”式开发思维，认识、测度当下的生态环境状况，进而回顾、掌握生态环境演变的规律，对生态保护和高质量发展具有重要的现实意义。流域是区域经济社会发展和生态系统的重要空间载体，是一个具有特定的结构和功能、相对独立完整的自然资源-生态环境-人类社会的复杂系统。生态环境子系统是流域巨系统的重要组成部分，其结构功能、格局过程受流域内自然和人为因素的不断影响，呈现出差异化的反馈状态。

流域生态环境变化研究是当前区域综合研究的热点[1-3]。李长安等[4]提出了长江流域生态环境系统演变的几个关键科学问题，如流域生态环境系统的演化过程与退化机理、山-河-湖互动规律及耦合关系等。王思远等[5]采用层次分析法和空间主成分分法，构建了一套评价指标体系用以评价黄河流域生态环境，并进行了分级制图和动态研究。20 世纪 80 年代，“世界气候研究计划”（WCRP，1980 年）、“国际地圈生物圈计划”（IGBP，1987 年）、“生物多样性计划”（DIVERSITAS，1991 年）、“国际全球环境变化的人文因素计划”（HDP，1996 年）四大全球环境变化研究计划先后成立，并于 2001 年联合组建了地球系统科学联盟（ESSP），从地球系统的全方位审视和研究全球环境变化问题及其影响，促进人类社会可持续发展[6]。

黄河流域演变研究多聚焦在水沙[7]、干旱[8]、水文水资源[9]、经济[10]等单一领域或局部特征分析，站在流域巨系统角度进行整体性评价的研究十分有限，跨专业协同、多系统耦合的研究成果较少。黄河流域生态环境演变特征的探索，对流域生态格局和过程的科学测度具有重要的促进作用，越来越多的研究开始从生态环境综合评价、生态安全、生态环境

本文系中国工程院咨询研究项目（项目编号：2019-XZ-65）的研究成果之一。

脆弱性、生态系统服务功能、生态工程管理等重要的生态学视角为切入点，探索更深、更广和更加系统的黄河流域研究新模式[11-19]。相关的研究方法也逐步由定性转为定量，由物理转向信息，由局部转向系统。2019 年，黄河流域生态保护和高质量发展上升为重大国家战略，如何从战略高度、系统角度为重大国家战略提供科学支撑，迫切需要开展系整体性、针对性、多学科交叉的深入研究。

本研究以黄河流域生态环境演变特征为切入点，统计了黄河流域近 40 年的主要生态环境数据，通过熵权分析计算得到流域环境发展指数（Environment Development Index，EDI），计量了黄河流域近 40 年的生态环境演变特征，以期为新形势下黄河流域发展质量综合评估和决策提供科学依据。

2 数据与方法

2.1 研究区概况

黄河流域位于 32° ～42° N、96° ～119° E，西起巴彦喀拉山，东临渤海，南至秦岭，北抵阴山，流域面积 79.5 万 km2。黄河流域幅员辽阔，地貌差别很大，从西到东横跨青藏高原、内蒙古高原、黄土高原和黄淮海平原。地势西高东低，流域北部属干旱气候，中部属半干旱气候，南部属湿润、半湿润气候，多年平均降水量为 476 mm，且主要集中在 6～9 月。

黄河流经九省，全长 5464 km，是我国第二大河。黄河流域省份 2018 年底总人口 4.2 亿，占全国 30.3 %；地区生产总值 23.9 万亿元，占全国 26.5 %。黄河流域在我国经济社会发展和生态安全方面具有十分重要的地位。黄河流域生态环境整体较脆弱，多年来，防洪减灾、水沙治理、水土保持、生态保护和修复等人类活动对流域生态环境积极向好发展提供了重要的驱动力，但仍然存在上游水源涵养功能降低、中游水土流失严重和支流污染、下游湿地萎缩等突出生态环境问题。

2.2 数据来源与处理

本研究中，黄河干流重要断面生态基流、黄河流域水网及水资源量空间数据集、水功能区及水体达标情况、主要支流水体达标统计、土壤侵蚀模数空间数据集、黄土高原水土流失治理面积等数据由水利部黄河水利委员会提供。

土地利用、NDVI 等空间数据集下载自中国科学院资源环境科学与数据中心（www.resdc.cn）。典型区域湿地面积利用多年 Landsat 卫星影像数据源进行遥感解译得到。数据研究时间为 1980～2019 年。

2.3 研究方法

（1）环境发展指数

本研究采用张金良团队研究成果中关于可能度函数的新型信息熵算法（《一种用于流域系统发展质量综合评估的新型理论方法——以黄河流域为例》）得到相关指标的年度熵值，再利用熵权法计算生态环境系统熵。在此基础上，基于生态环境系统熵结果定义环境发展指数（Environment Development Index，EDI）。

① 熵权计算　信息熵是信息量和不确定性的度量，某指标带来的信息量越大，熵值越低，不确定性就越低，也就可以赋予其较大的权重。利用熵权分析方法计算指标权重可以减少主观判断、固有经验、随机事件等的干扰。熵权法更大的意义在于，随着各指标信息熵值的变化，每个指标在系统中的权重也随之变化，这些指标相互作用，动态互动，就可以实时监测指标在系统中的重要性的变化，对系统指标的综合评价提供依据，与传统恒定人为赋权相比具动态性和系统性。

基于每个指标$\mathrm{i}(\mathrm{i}=1,2,\ldots,\mathrm{N})$的信息熵值$S_i$，其权重（用$w_i$表示）用公式求得：

$$w_i = \frac{1-S_i}{N-\sum_{i=1}^{N} S_i} \quad (1)$$

利用各指标的熵值和权重，经过加权求和，可以计算得出流域生态环境子系统总熵，如下公式所示：

$$S_{sys} = \sum_{i=1}^{N} w_i * S_i \quad (2)$$

② 指数计算　环境发展指数是流域发展指数体系的重要指标，是生态环境子系统作为流域巨系统有机组成的关键内核之一。EDI 从生态环境保护角度出发，量化研究生境质量、植被覆盖、土地胁迫、水网湿地等相关因素，是基于系统理论和熵权分析得到的用于评价流域生态环境发展质量的综合性指标。本研究采用熵权法对 9 项黄河流域生态环境子系统指标进行加权求和，就得到系统熵值，即 EDI 值，用来评价流域生态环境发展演变状况。EDI 计算公式为：

$$EDI = [1 - \sum_{i=1}^{N} S_i * W_i] * 100 \quad (3)$$

式中，S_i 为各指标熵值，W_i 为各指标对应的熵权，N 为用以计算生态环境指标数。

（2）生态环境指标

研究从黄河流域生态保护发展目标出发，选取了能够充分反映流域生态环境特征且可获取的 9 项指标，通过熵权法计算 EDI，相关指标见表 1。

表 1　EDI 计算所需指标

序号	指标	单位
1	重要断面生态基流保证率	%
2	重要水功能区水质达标率	%
3	重要支流水质达到或优于Ⅲ类河长比例	%
4	生境质量指数	—
5	植被覆盖指数	—
6	水网密度指数	—
7	土地胁迫指数	—
8	黄土高原水土流失治理面积	km^2
9	典型区域湿地面积变化率	%

① 重要断面生态基流保证率

重要断面生态基流保证率=满足生态基流的月份（年份）/总评价月份（年份）。是表征生态用水保障程度的指标，值越大，生态用水保障程度越高。重要断面包括黄河干流兰州、花园口、利津 3 处。

② 重要水功能区水质达标率

重要水功能区水质达标率=水质达标的水功能区个数/水功能区总个数。该指标是区域尺度表征水质优劣的指标，值越大，水质越优。黄河流域重要水功能区 340 个，计入水质达标率的为 294 个，详见各年度《黄河水资源公报》。

③ 重要支流水质达到或优于Ⅲ类河长比例

重要支流水质达到或优于Ⅲ类河长比例=水质达到或优于Ⅲ类河长/总评价河长。该指标是河流尺度表征水质优劣的指标，值越大，水质越优。重要支流包括：大夏河、洮河、湟水、大通河、汾河、渭河、北洛河、泾河、伊洛河、沁河、东平湖。

④ 生境质量指数

生境质量指数（I_{HQ}）评价区域内生物栖息地质量，利用单位面积上不同生态系统类型在生物物种数量上的差异表示。

$$I_{HQ}=A_{bio}\times(0.35\times S_{林地}+0.21\times S_{草地}+0.28\times S_{水域湿地}+0.11\times S_{耕地}+0.04\times S_{建设用地}+0.01\times S_{未利用地})/S \quad (4)$$

式中，A_{bio}为生境质量指数的归一化系数，$S_{林地}$、$S_{草地}$、$S_{水域湿地}$、$S_{耕地}$、$S_{建设用地}$、$S_{未利用地}$分别为对应的生境类型面积，S 为区域面积，参考值为 511.2642131067。面积单位为 km^2。

⑤ 植被覆盖指数

植被覆盖指数（I_{VC}）评价区域植被覆盖的程度，利用区域单位面积归一化植被指数（NDVI）表示。

$$I_{VC}= NDVI_{区域均值}=A_{veg}\times\left(\frac{\sum_{i=1}^{n}P_i}{n}\right) \quad (5)$$

式中，A_{veg}为植被覆盖指数的归一化系数，参考值为 0.0121165124。

⑥ 水网密度指数（IWND）

水网密度指数评价区域内水的丰富程度，利用评价区域内单位面积河流总长度、水域面积和水资源量表示。

$$I_{WND}=（A_{riv}\mathrm{A_{riv}}\times 河流长度/区域面积+A_{lak}\times 水域面积（湖泊、水库、河渠和近海）/区域面积+A_{res}\times 水资源量^{*}/区域面积）/3 \quad (6)$$

式中，A_{riv}为河流长度的归一化系数，参考值为 84.3704083981，A_{lak}为水域面积的归一化系数，参考值为 591.7908642005，A_{res}为水资源量的归一化系数，参考值为 86.3869548281。河流长度单位为 km，区域、水域面积单位为 km^2，水资源量单位为百万 m^3。

⑦ 土地胁迫指数

土地胁迫指数（I_{LS}）评价区域内土地质量遭受胁迫的程度，利用区域内单位面积上水土流失、土地沙化、土地开发等胁迫类型面积表示。

$$I_{LS}=A_{ero}\times（0.4\times S_{重度侵蚀}+0.2\times S_{中度侵蚀}+0.2\times S_{建设用地}+0.2\times S_{其他土地胁迫}）/S \quad (7)$$

式中，$S_{重度侵蚀}$、$S_{中度侵蚀}$、$S_{建设用地}$、$S_{其他土地胁迫}$为对应类型土地面积，S为区域面积，A_{ero}为土地胁迫指数的归一化系数，参考值为 236.0435677948。面积单位为 km^2。

⑧ 黄土高原水土流失治理面积

黄土高原水土流失治理面积（S_{CWS}）单位为 km^2。

⑨ 典型区域湿地面积变化率（RC）

典型区域湿地指黄河源区、乌梁素海和黄河三角洲，分别位于流域上、中、下游。典型区域湿地面积变化率公式为：

$$R_C=（S_{i+1}-S_i）/S_i \quad (8)$$

式中，S_i为第 i 年湿地面积，S_{i+1}为第 i+1 年湿地面积。面积单位为 km^2。

（3）三次样条函数法

三次样条函数法是指将实测点坐标光滑连接，得到平顺趋势曲线的方法。本研究采用三次样条函数法对 1980～2019 年黄河流域生态环境子系统 EDI 进行趋势拟合。已有实测点 x，y 坐标，在原测量点处仍保持原测量值，曲线内所有测点（除两端点外）的一阶导数和二阶导数连续，如下式所示：

$$S_i'(x_{i-0})=S_{i+1}'(x_{i+0}) \quad (9)$$

$$S_i''(x_{i-0})=S_{i+1}''(x_{i+0}) \quad (10)$$

式中$i=2,3,\cdots,n-1$，将原测点的函数值、一阶导数、二阶导数求出后，根据需要，

可以在两测量点之间插值计算无限个的函数值、一阶导数和二阶导数。给定一个区间（闭合区间）为[a, b],共有 n 个测点（n-1 段），即：$a=x_1<x_2<x_3\cdots<x_{n-1}<x_n=b$，其内部的三次样条函数为 $S_p(\forall, 3)$，其中∀为闭合区间[a , b]。约束条件如下：

内点条件

$$S(x) \in S_p(\forall, 3)$$
$$S(x_i) = y_i$$
$$i = 2,3,\cdots,n-1$$

边界条件

$$S(x_i) = y_i$$
$$S'(x_i) = y_i'$$
$$i = 1, n$$

三次样条函数的形式如下：

$$S_i(x) = a_{0,i} + a_{1,i}x + a_{2,i}x^2 + a_{3,i}x^3 \quad (11)$$
$$i = 2,3,\cdots,n-1$$

可见，三次样条函数法可保证插值曲线曲率（近似于曲线的二阶导数）线性变化，从而防止曲线发生突变而造成插值的不确定性。

3 结果与分析

3.1 熵权分析

图 1 为 10 项指标的熵权值，每年的各项指标熵权值和为 1。与传统专家打分等权重指标体系方法不同，本研究计算的黄河流域生态环境子系统的指标的权存在随时间序列的动态变化，说明不同指标对子系统状态的影响程度在不同时间存在差异。重要断面生态基流保证率熵权均值为 0.1390，其随时间变化整体呈“下降-上升”趋势，水网密度熵权变化趋势与之相似。生境质量指数熵权均值为 0.1222，整体呈平缓下降趋势；植被覆盖度指数熵权均值为 0.1249，整体呈平缓上升趋势；重要水功能区水质达标率熵权均值为 0.0919，整体呈现出一定的波动性。重要支流水质达到或优于III类河长比例、土地胁迫指数、黄土高原水土流失治理面积、典型区域湿地面积变化率 4 项指标熵权在 21 世纪初至今时间段的趋势相对一致，均为先减后增。

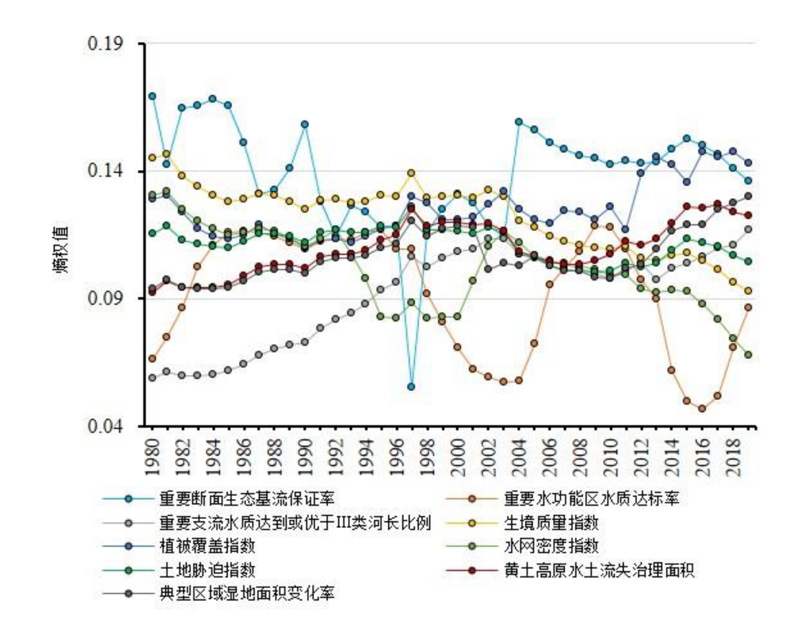


图 1 1980～2019 年黄河流域生态环境指标熵权变化

图 2 为 10 项指标熵权箱线图，用以解析数据分布和整体状态。箱体内部的实线为中位数，叉为平均值。整体的指标权重排名为：重要断面生态基流保障率、植被覆盖度、生境质量指数、黄土高原水土流失治理面积、土地胁迫指数、水网密度指数、重要支流水质达到或优于III类河长比例、典型区域湿地面积增长率、重要水功能区水质达标率和万元工业增加值用水量。其中，重要断面生态基流保证率熵权存在一个异常值，为 1997 年的 0.0553。各项指标在每年熵权结构中排名第一的有 3 项，分别是重要断面生态基流保障率，生境质量指数和植被覆盖指数，出现率分别为 57.5 %、32.5 %和 10.0 %。每年熵权结构中排名第二的有 4 项，分别是植被覆盖指数、生境质量指数、重要断面生态基流保障率和水网密度指数，出现率分别为 45.0 %、27.5 %、25.0%和 2.5 %。

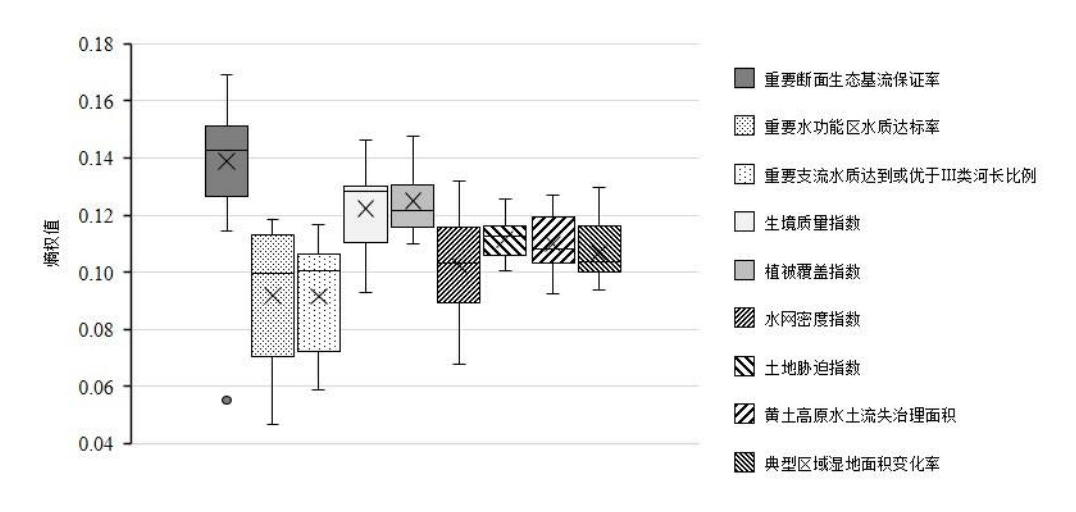


图 2 1980～2019 年黄河流域生态环境指标熵权箱线图

3.2 EDI分析

图 3 为黄河流域 1980～2020 年 EDI 演变情况。近 40 年，黄河流域 EDI 的平均值为 64.23，最大值为 76.60（2019 年），最小值为 56.64（1981 年）。流域 EDI 总体呈现“稳定-增长”的变化趋势，2003 年显著增长，之后 EDI 持续上升。

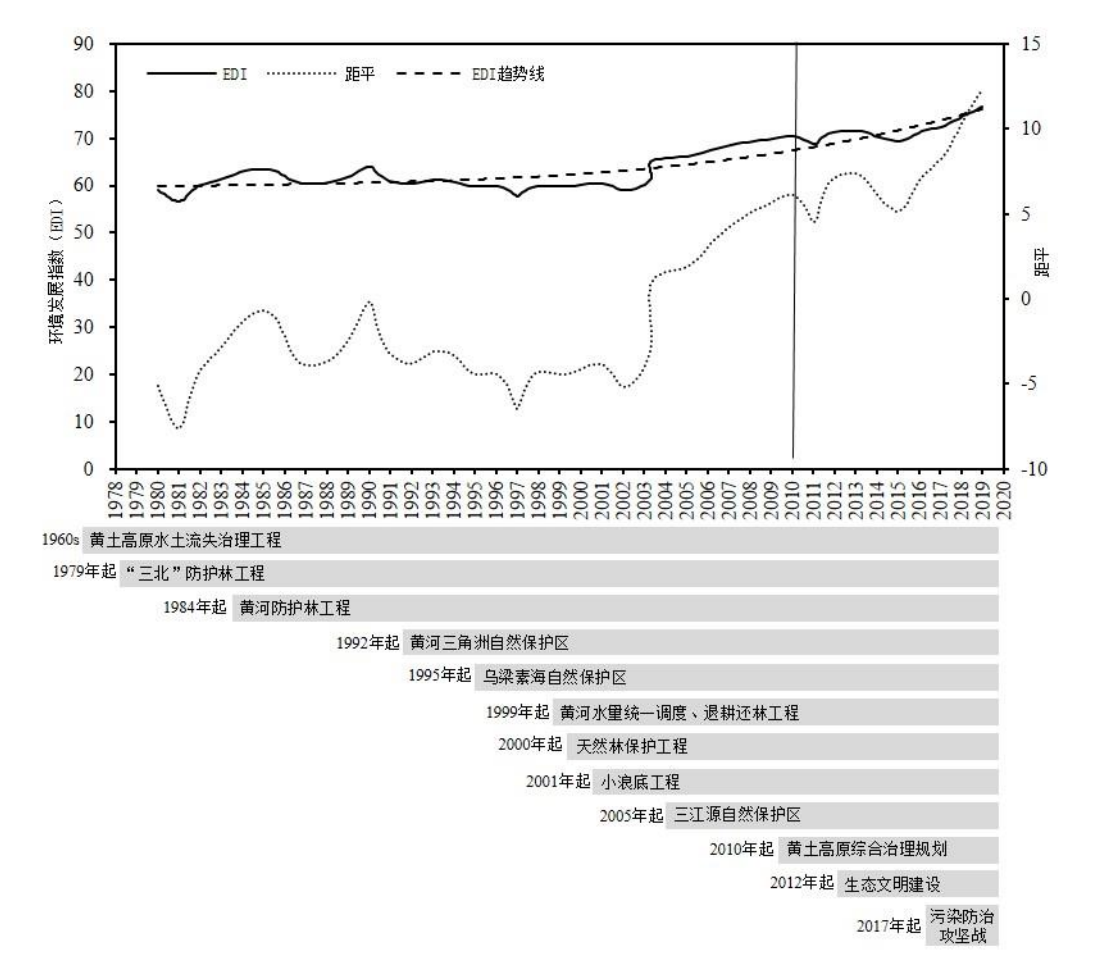


图 3 1980～2019 年黄河流域 EDI 演变

自上世纪 60 年代，黄土高原水土流失治理工程、“三北”防护林工程逐步实施，黄河三角洲、乌梁素海等重要自然保护区相继建立，流域生态保护和治理不断推进，促进了流域局部生态环境的好转，但保护和治理力度有限，系统性不足。1980～2002 年 EDI 均值 60.54，低于全时段均值 64.40，流域整体生态环境状况处于相对较低的水平。1980～2002 年，植被覆盖指数及生境质量指数作为影响 EDI 的重要指标，变化较为稳定（图 5、图 6），而重要断面生态基流保障率存在波动性（图 4）。

2003 年后，随着黄河水量统一调度、生态文明建设、污染防治攻坚战等系统性更强的政策措施，以及退耕护岸林工程、天然林保护工程和小浪底工程等关键工程实施的实施，同时考虑黄土高源水土流失治理工程、“三北”防护林工程、自然保护区建设等生态工程的后效性，多重因素综合推动了黄河流域生态环境质量的整体改善，EDI 值显著上升并持续增长。重要断面生态基流保障率在 2002 年后，逐渐趋于平稳，并且相对稳定在 100 %。2003 年及之后的流域植被覆盖指数较 1980～2002 年有较大增长，2019 年较 2002 年的增幅达到 21.26%，且正增长频度显著高于负增长。

3.3 主要特征指标分析

基于上述熵权和 EDI 分析，选取综合熵权排名前 3 项的生态环境指标进行分析。

（1）重要断面生态基流保障率

图 4 为黄河干流兰州、花园口和利津断面 1980～2009 年生态基流保证率变化情况。由图可知，在兰州断面的生态基流保证率均为 100%，说明黄河干流上游生态水量较充足，为兰州鲇等重要土著保护鱼类提供了基本的栖息环境。花园口、利津均位于黄河下游，这里

是黄河鲤等鱼类重要的栖息河道。可以看到花园口、利津生态流量在 1980～2003 年间存在显著缺口，特别是最下游的利津断面，个别年份生态基流保证率不足 30 %，有 7 年时间甚至低于花园口断面历史保证率最低值。随着黄河水量统一调度、小浪底调水调沙等的实施，特别是流域上中游地区水资源利用不断集约节约，从 2004 年至今，3 个主要断面的生态基流保证率几乎全部达到 100 %。该指标的演化趋势直接体现了黄河干流生态水量的系统性改善，表征了流域生态环境子系统状况在持续向好发展。

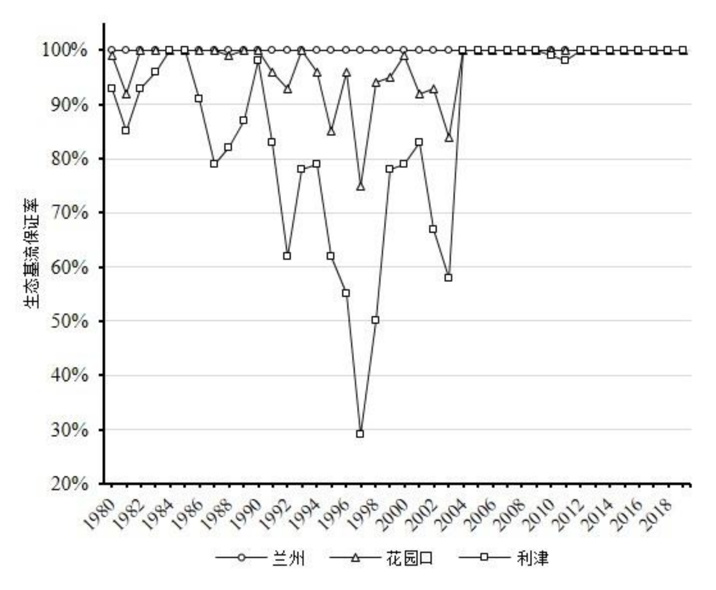


图 4 1980～2019 年黄河流域重要断面生态基流保证率

（2）植被覆盖度指数

图 5 为黄河流域及域内各省范围植被覆盖指数变化率。1980～2009 年全流域植被覆盖度总体呈增长趋势，仅有 8 年为下降，其他年份均为增长，总体年均增长率 0.91 %。其中，内蒙古、山西、陕西三省的植被覆盖状况改善显著，年均增长率分别为 1.69 %、1.65 %和 1.47 %，显著高于其他省；宁夏、甘肃年植被覆盖指数年均增长率分别为 1.29 %、1.17 %，高于流域均值。说明相关省份在水土流失治理和林草保护与修复方面的工作效果显著。

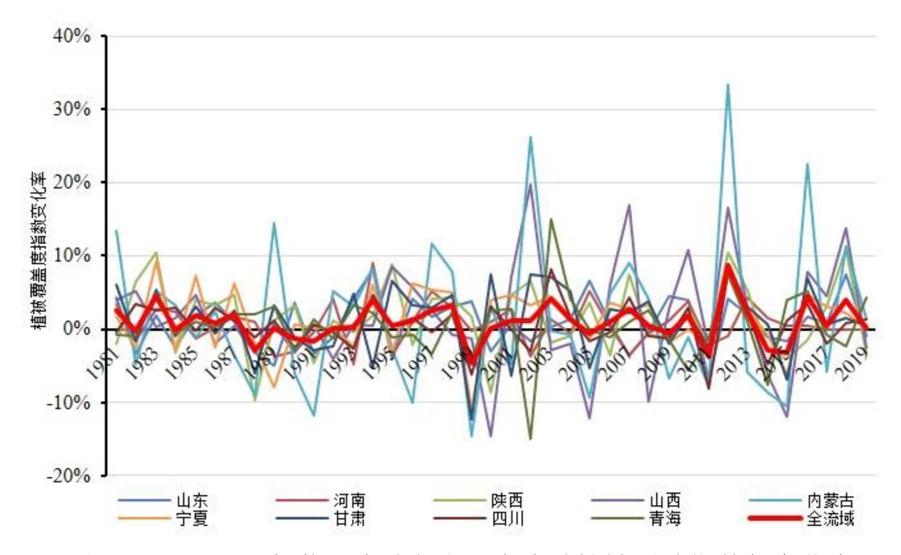


图 5 1980～2019 年黄河流域各省及全流域植被覆盖指数年变化率

（3）生境质量指数

图 6 为黄河流域及域内各省范围生境质量指数变化率。1980～2009 年全流域生境质量

总体稳定，存在缓慢的波动变化，年均变化率不足 0.1 %，说明随着区域经济社会的不断发展，特别是城镇化、农业规模化等对自然生境的挤压，流域内生境质量总体稳定，重要野生动植物栖息地和生境得到了有效保护和修复。各省生境质量变化存在差异。变幅最显著的是内蒙古，初期波动较大，之后逐渐放缓，说明生境质量下降的趋势在逐渐遏制，这可能与内蒙古黄河流域地区退耕还林还草还湿系统工程的成效开始显现有关。河南黄河流域多为大堤内滩区范围，生境质量存在阶段性下降，但 2006 年之后已呈上升趋势，随着黄河下游滩区综合提升和生态廊道建设，生境质量有望进一步改善。

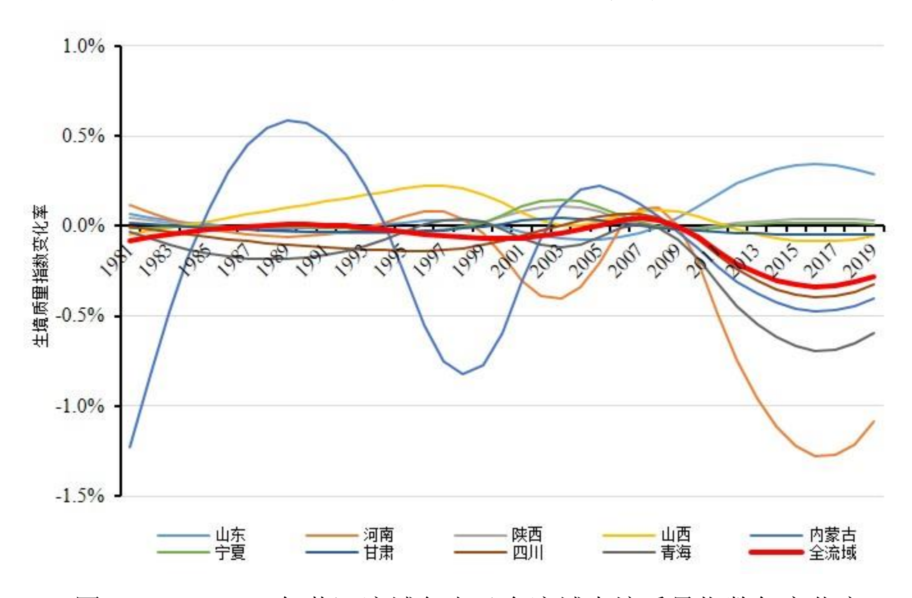


图 6 1980～2019 年黄河流域各省及全流域生境质量指数年变化率

4 结论

本研究构建了用于评价流域生态环境子系统综合质量的指数 EDI。EDI 描述的核心要素特征综合作用于流域生态环境子系统，其变化趋势即为系统状况动态。黄河流域 1980～2019 年 EDI 总体呈现“稳定-增长”的变化趋势，2003 年显著增长，之后 EDI 持续上升。说明经过多年的保护与治理，流域生态环境负反馈效应正在显现，系统逐步由混乱无序向稳定有序发展，黄河流域生态环境整体向好。

黄河流域生态环境子系统各项指标的熵权变化存在随时间序列的动态变化。单一年度的指标权重结构随时间变化不断调整，各项指标在系统中的重要性非恒定。EDI 指标权重综合排序为：重要断面生态基流保障率、植被覆盖度、生境质量指数、黄土高原水土流失治理面积、土地胁迫指数、水网密度指数、重要支流水质达到或优于III类河长比例、典型区域湿地面积增长率、重要水功能区水质达标率和万元工业增加值用水量。

重要断面生态基流保障率、生境质量指数、植被覆盖度指数等指标变化的规律呈现一定的时空差异。近 40 年时间内，黄河干流生态水量由下游断面难以保证逐步变化为全段保证率 100 %，植被覆盖度持续增加，生境质量总体稳定，均表征了黄河流域生态环境子系统状况在持续向好发展。

本研究对流域环境演变指数 EDI 进行了定量解析，对流域发展质量综合评估具有重要支撑，为后续研究和流域管理决策提供科学依据。但仍应认识到，黄河流域生态环境状况存在系统性、复杂性和波动性，其与河流系统、社会经济等子系统状态存在密切联系，在流域治理与重大工程的生态环境效应、演变驱动力、预案决策支撑等方面的探索还有待进一步研究。

参考文献:

[1] Li H, Wang S Q, Wang W X, Duan, Q. ,& Li, G.Y.. Three Parallel Rivers World Natural Heritage Hongshan District Ecological Security Assessment[J]. Advanced Materials Research, 2013, 610-613:673-676.

[2] Shen, Y., Cao, H., Tang, M., Deng, H. The Human Threat to River Ecosystems at the Watershed Scale: An Ecological Security Assessment of the Songhua River Basin, Northeast China[J]. Water, 2017,9, 219.

[3] Li G, Jiang C, Zhang Y, Jiang G. Whether land greening in different geomorphic units are beneficial to water yield in the Yellow River Basin? [J]. Ecological Indicator,2021, 120.

[4] 李长安,殷鸿福,俞中立,许厚泽,蔡述明,陈中原,王建,殷瑞兰.关于长江流域生态环境系统演变与调控研究的思考[J].长江流域资源与环境,2001,10(6),550-557.

[5] 王思远,王光谦,陈志祥.黄河流域生态环境综合评价及其演变[J].山地学报,2004,22(2):133-139.

[6] 张志强,王雪梅.国际全球变化研究发展态势文献计量评价[J].地球科学进展,2007,22(7):760-765.

[7] 胡国华,赵沛伦,肖翔群.黄河泥沙特性及对水环境的影响[J].水利水电技术.2004,35(8):17-20.

[8] 彭高辉,夏军,马秀峰,马建琴.黄河流域干旱频率分布级轮次数字特征分析[J].人民黄河.2011,33(6):3-12.

[9] 张建云,王国庆,贺瑞敏,刘翠善.黄河中游水文变化趋势及其对气候变化的响应[J].水科学进展.2009,20(2):153-158.

[10] 覃成林,李敏纳.区域经济空间分异机制援救—一个理论分析模型及其在黄河流域的应用[J].地理研究.2010,,29(10):1780-1792.

[11] 金斌松,聂明,李琴,陈家宽,周文斌.鄱阳湖流域基本特征、面临挑战和关键科学问题[J].长江流域资源与环境.2012,21(3):268-275.

[12] 李树元.海河流域生态环境关键严肃演变规律与脆弱性研究[D].天津,天津大学.2013.

[13] 张亚玲,苏惠敏,张小勇.1998-2012 年黄河流域植被覆盖变化时空分析[J].中国沙漠.2014,34(2):597-602.

[14] 刘晓君,李占斌,李鹏,张铁钢,徐国策,高海东.基于土地利用/覆被变化的流域景观格局与水沙响应关系研究[J].生态学报.2016,36(18):5691-5700.

[15] 张琨,吕一河,傅博杰,尹礼唱,于丹丹.黄土高原植被覆盖变化对生态系统服务影响及其阈值[J].地理学报.2020,75(5):949-960.

[16] Zhang Y, Lu X, Liu B, Wu D, Fu G, Zhao Y, Sun P. Spatial relationships between ecosystem services and socioecological drivers across a large-scale region: A case study in the Yellow River Basin[J]. Science of Total Environment, 2020, 142480.

[17] Shi F,Liu S, Sun Y, An Y, Zhao S, Liu Y, Li M. Ecological network construction of the heterogeneous agro-pastoral areas in the upper Yellow River basin.Agricultural[J], Ecosystems & Environment, 2020, 302.

[18] 张金良,练继建,张远生,罗秋实.黄河水沙关系协调度与骨干水库的调节作用[J].水利学报.2020,51(8):897-905.

[19] Xu K P, Wang H N, Wang J J, Wang X H, Chi Y Y, Zhang X. Environmental function zoning for spatially differential environmental policies in China[J]. Journal of Environmental Management, 2020, 255: 109485.

（通讯作者：陈凯 E-mail: chenkai0201@163.com）

The Change Characteristics of Ecological Environment in the Yellow River Basin based on Entropy Weights

ZHANG Jinliang， CHEN Kai，ZHANG Chao，GUO Pengcheng

(Yellow River Engineering Consulting Co.Ltd，Zhengzhou 450003，China)

Abstract: The ecological environment of the Yellow River Basin is systematic and complicated. It is of great significance to study the quantitative evaluation and change characteristics of the Yellow River Basin by providing scientific basis on integrated river basin management. This in one of the current widespread concerns and urgent problems to be solved. Through

calculating the entropy weights of eco-environmental indicators in Yellow River Basin from 1980 to 2019, the dynamic entropy weight results were verified. Then the importance of the individual indicator in system was proved to be variable. On this basis, the EDIs (Environment Development Indexes) of the Yellow River Basin from 1980 to 2019 were analyzed and plotted by curve, which valued between 56.64～76.60. The changing trend of EDI in the Yellow River Basin was almost presented stabilized before 2003, and continuously increasing from 2003. The results show that through the years of protection and restoration, the ecological negative feedback was exerted profound effect, resulting the ecological environment of the Yellow River Basin was changing well.
Key Words: ecological environment; change characteristic; vegetation coverage; habitat quality; the Yellow River Basin

作者贡献声明：

张金良：提出研究思路，设计研究方案

陈凯，张超：采集、清洗和分析数据，论文起草；

郭鹏程：论文最终版本修订。